干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

河西走廊中东部春季沙尘暴变化特征及其典型个例分析

杨 梅[1,2]， 李岩瑛[1,2]， 张春燕[1]， 杨吉萍[3]， 罗晓玲[1]， 聂 鑫[2]
（1. 甘肃省武威市气象局，甘肃 武威 733000；2. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃 兰州 730020；
3. 民勤县气象局，甘肃 民勤 733300）

摘 要：河西走廊中东部是我国春季沙尘暴的高发区和重灾区，近40 a来共造成经济损失超15×10^8元，近百人死亡。该区春季沙尘暴具有明显的日变化，为了深入分析其时间变化规律，提高预报预警能力，利用该区3个代表站1961—2019年沙尘暴地面观测资料及2019年5月2次沙尘暴过程的气象资料，采用天气学、动力学和统计学相结合的方法，得出该区春季沙尘暴的昼夜时间变化特征和预报着眼点。结果表明：(1) 河西走廊中东部春季沙尘暴日数近60 a呈减少趋势，20世纪80年代显著减少；各站不同强度沙尘暴昼夜变化明显：白天多且风速较大，20世纪80年代后一般沙尘暴多于强沙尘暴，高发区均在民勤。(2) 沙尘暴过境时各站盛行风向昼夜一致，集中在西北风到偏北风之间；强沙尘暴最强出现在00:00—01:00、18:00—19:00，一般沙尘暴最强出现在08:00—09:00。(3) 进一步对2019年5月午后和夜间发生的2次沙尘暴过程进行对比分析：午后过程风力大、有灾情；夜间过程强度强、持续时间长。2次过程虽然中低层形势基本相同，沙尘暴出现在水平螺旋度负值中心下游及地气温差大值时，但高空500 hPa形势不同：午后过程为横槽转竖，气温日较差、风速日变化大，层结不稳定，有高空风动量下传，且近地面层最大风速出现高度低；夜间过程主要是不稳定低槽发展和蒙古气旋底部冷锋影响，配合强的垂直上升运动，但垂直风切变小。(4) 河西走廊中东部春季沙尘暴不仅与大型的环流形势有关，还与垂直速度、水平螺旋度、全风速等物理量，以及地面温湿风日变化、不稳定参数和边界层要素有关。

关 键 词：春季沙尘暴；变化特征；预报着眼点；河西走廊中东部
文章编号：

沙尘暴不仅影响当地人民生活生存环境和工农业生产，而且其向大气排放的沙尘通过远距离传输对下游地区空气质量、生态环境及气候变化等造成严重影响[1-7]，因此加强沙尘暴的分析研究已成为大家关注和国家防灾减灾的重点工作之一。众多学者在沙尘暴的时空分布、发生源地、移动路径和天气气候成因等做了大量研究[8-22]。Yang 等[8]认为东亚沙尘暴具有约10 a的振荡周期；Indoitu 等[9]强调近几十年中亚地区沙尘暴呈减少趋势，并确定了沙尘活跃区；Kurosaki 等[10]研究了沙尘暴活动频次与地面风速的关系；张莉等[11]分析了中国北方沙尘暴日数的演变趋势及其与各气象要素的关系；李万源等[12]通过线性拟合发现沙尘暴的正影响因子有风速和蒸发量，负影响因子有水汽压、相对湿度和最低气温等。我国北方的干旱、半干旱地区是沙尘暴的易发区，其中河西走廊是多发区；沙尘暴主要发生在春季，并具有明显的日变化，13:00—14:00是风沙天气出现最多和强度最强的时段[13-18]。目前沙尘暴不仅仅作为气象灾害受到关注，还成为严重的环境问题。虽然高振荣等[19]认为近55 a来河西走廊沙尘暴呈明显振荡式减少趋势，但2019年5月河西走廊地区沙尘暴出现次数为近8 a最多，而春季或春、夏时节的沙尘暴容易成灾。同样1980—2007年该区的沙尘暴发生次数减弱而强度增强[20]，尽管

收稿日期：2020-08-18； **修订日期**：2020-11-04
基金项目：国家自然科学基金面上项目（41975015）
作者简介：杨梅（1987-），女，工程师，主要从事天气预报和研究工作. E-mail: wwqxjym@163.com
通讯作者：李岩瑛（1970-），女，正研级高级工程师，主要从事天气预报和研究工作. E-mail: lyyqxj@163.com

2009—2014年区域内绿洲面积均呈增加趋势[21],降雨量和降雨频率增加,干期持续时间缩短,生态环境改善[22],但1995—2015年的沙漠面积中西北干旱区减少最小[23],人口快速增长加剧了沙漠化[24],因此北部沙漠面积较多的河西走廊,出现强沙尘暴灾害的可能性依然存在。河西走廊中东部是我国沙尘暴发生次数最多,且死亡人数、经济损失等灾情较重的区域,如1977年4月22日中部张掖黑风死亡54人,1993年5月5日东部武威黑风直接经济损失1.36×10^{8}元,死亡43人。春季沙尘暴出现多,灾情重,日变化较其他季节显著[25-26],但目前对其不同强度沙尘暴昼夜变化的时间特征及成因研究较少。本文以1961—2019年河西走廊中东部春季沙尘暴为背景,重点对2019年5月11日和14—15日发生在河西走廊中东部的2次大风沙尘暴过程进行对比分析和诊断,以期得到春季大风沙尘暴昼夜变化规律和特点,提高预报预警能力。

1 研究区概况

河西走廊中东部地处青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的接壤地带,西邻南疆塔克拉玛干大沙漠和戈壁荒漠,北与内蒙古巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠接壤,西南倚靠青藏高原,东与黄土高原交错,地理位置大约位于97°~104°E,36°~40°N之间(图1),地形呈西北—东南走向的狭长平地,形如走廊。河西走廊中东部具有独特的地理环境,土壤含水率整体偏低[27],土地荒漠化严重,仅东部民勤荒漠化土

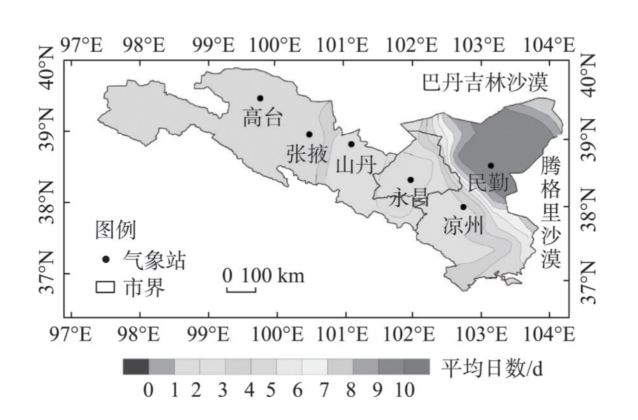


图1 1961—2019年河西走廊中东部气象站点及春季沙尘暴年平均日数空间分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and average annual days of spring sandstorms during 1961—2019 in the middle east of Hexi Corridor

地面积达94.5%,是沙尘暴的发源地和频发区,加之周边丰富的沙尘源地,为沙尘暴提供了丰富的沙源。且河西走廊中东部属大陆性干旱气候区,年降水量不足150 mm,尤其春季冷空气活动频繁,冷热变化剧烈,干旱频次高,风大沙多,当冷空气东移南下通过走廊的狭管效应作用,风速显著增大,为沙尘暴的形成提供有利的动力条件。

2 资料与方法

2.1 资料

选取1961—2019年河西走廊中东部张掖、凉州、民勤3个代表站沙尘暴春季地面观测资料,由河西走廊中东部6个气象站点春季年平均沙尘暴日数(图1)可见,张掖、凉州及民勤为该区域沙尘暴多发区和重灾区。2019年5月发生在河西走廊中东部2次沙尘暴过程天气过程的高低空气象观测资料,其中,2019年5月2次沙尘暴过程为近10 a出现站点最多和强度最强的沙尘暴过程。

2.2 方法

强沙尘暴能见度0~499 m,一般沙尘暴能见度500~1000 m。沙尘暴起始时间的确定四舍五入为整点,不同时段出现时间是每个时段的起始时间,能见度不明确按999 m计算。用线性趋势回归方法,分析沙尘暴的年变化趋势。运用时间和春季沙尘暴日数之间的相关系数进行变化趋势的显著性检验。用距平统计方法研究沙尘暴的年代变化。通过水平螺旋度[28]研究这2次沙尘暴过程水平螺旋度负值与大风沙尘暴发生时间和强度对应关系,计算公式如下:

$$\mathrm{he}=\int_0^h\left(\vec{V}-\vec{C}\right)\vec{\omega}\mathrm{d}z \tag{1}$$

式中:he为水平螺旋度($m^2\cdot s^{-2}$);$\vec{V}$和$\vec{C}$分别是环境风场、风暴移动速度($m\cdot s^{-1}$);h是气层厚度(m);$\vec{\omega}$为水平涡度矢量(s^{-1})。

3 春季沙尘暴气候特征

3.1 沙尘暴的年代际变化

河西走廊中东部张掖、凉州及民勤各年代际年均沙尘暴日数(图2)表明:张掖20世纪60年代较多,民勤、凉州20世纪70年代较多,民勤达14.7 d;近60 a来3站沙尘暴呈减少趋势,20世纪90年代迅

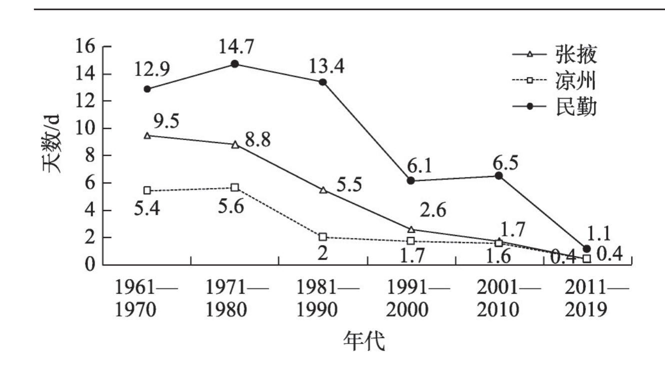


图2 春季沙尘暴日数的年代际分布

Fig. 2 Decadal distribution of sandstorm days in spring

速减少，民勤不足7 d；2011—2019年的年均沙尘暴日数不足1 d。20世纪60—70年代是春季沙尘暴天气的高发期。

3.2 沙尘暴的年际变化

1961—2019年张掖、凉州及民勤春季沙尘暴日数年际变化的线性方程中倾向率分别为-0.105、-0.268、-0.199，相关系数分别为0.439、0.627、0.648，均通过99%的显著性水平检验，沙尘暴日数呈明显振荡式减少趋势(图3)。在1979、2002年(2001年凉州)发生由多到少的突变；张掖20世纪60年代后期波动减少，80年代减少显著，2003年后随着植被增多，沙尘暴日数不足2 d；凉州20世纪80年代开始减少，80年代中期和21世纪初期迅速减少，1984—1998、2003—2017年小于2 d；民勤自20世纪60年代呈波动减少，70年代后期突增，自80年代又开始减少，2011—2017年在1 d左右；但近2 a(2018、2019年)3站的沙尘暴日数均呈增多趋势。

3.3 沙尘暴昼夜年代际变化

各年代际春季不同强度沙尘暴的昼夜变化明显且有一定的规律性，总体上各站年平均沙尘暴日数是减少的，白天多于夜间，20世纪80年代后一般沙尘暴均多于强沙尘暴，但2011—2019年张掖和凉州强沙尘暴出现在夜间；不同强度沙尘暴不同时间段的高发区均在民勤。

张掖强沙尘暴呈持续减少趋势，2011—2019年白天无强沙尘暴，而夜间上升为0.2 d；一般沙尘暴昼夜变化一致，呈单峰值，20世纪80年代达到最大值，2011—2019年减少为0~0.6 d。凉州不同强度沙尘暴昼夜变化基本一致，呈持续下降，20世纪80年代到21世纪初期夜间未出现强沙尘暴，而2011—2019年强沙尘暴为0.1 d。民勤强沙尘暴昼夜变化一致，呈波动下降趋势，20世纪70年代多于60年代，21世纪初期略有上升，2011—2019年民勤强沙尘暴减少到0.3 d以下；民勤一般沙尘暴昼夜变化和张掖相似，呈单峰值，20世纪80年代达到最大值，2011—2019年民勤一般沙尘暴减少为0.2~0.6 d(图4)。

3.4 沙尘暴风向昼夜变化玫瑰图

1971—2019年春季沙尘暴最大风速的风向玫瑰图(图5)表明，张掖、凉州及民勤3站沙尘暴过境最大风速的风向昼夜变化不明显，昼夜盛行风向一致，在西北风到偏北风之间。各站盛行风向略有不同，张掖以北北西风为主，其次白天为北风，夜间为西北风；凉州以北风为主，其次白天为北北西风，夜间为北北东风；民勤以西北风为主，其次为北北西

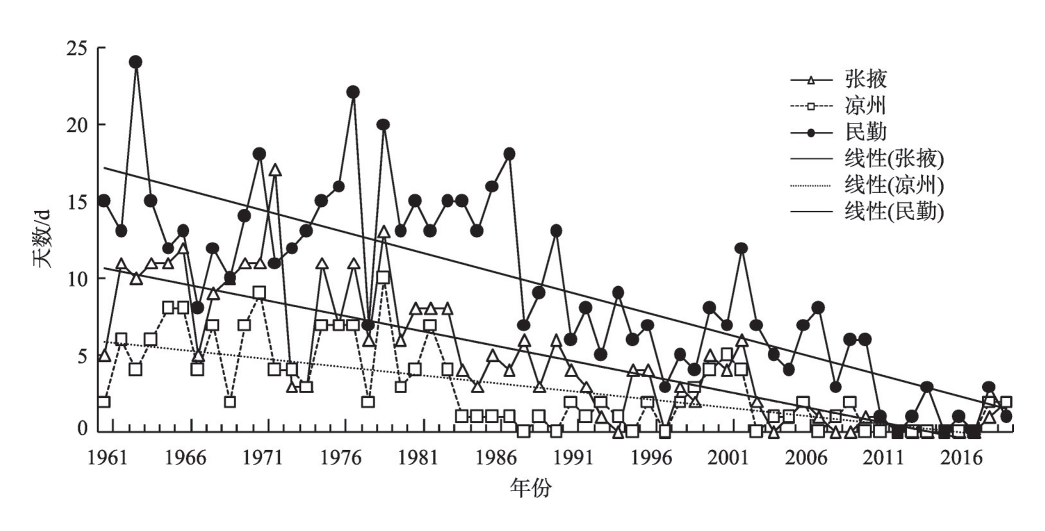
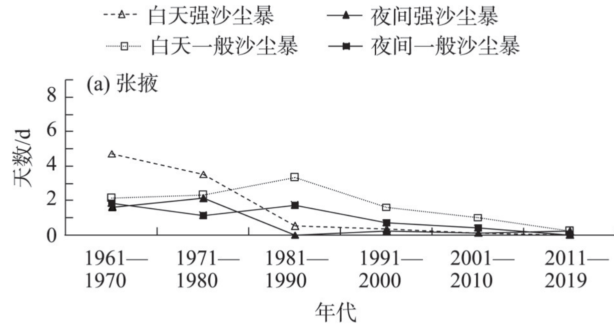
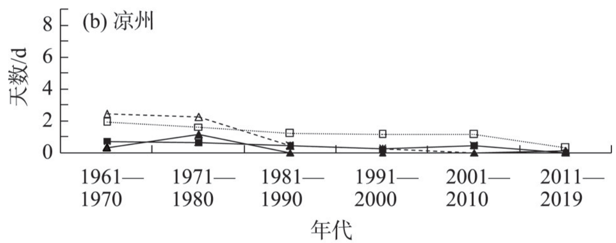


图3 1961—2019年春季沙尘暴日数的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of sandstorm days in spring during 1961—2019





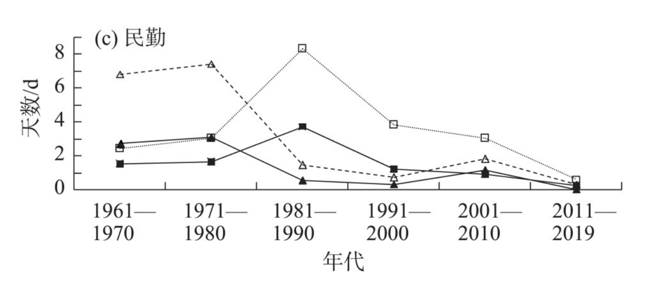


图4 春季不同强度沙尘暴昼夜变化的年代际分布

Fig. 4 Interdecadal distributions of daily variation of spring sandstorm days under different intensities

风;主导风向主要受天气系统、测站周围小环境和地形影响。分析春季沙尘暴最大风速昼夜变化:最大风速昼夜变化明显,白天风速比夜间均大1.0 $m\cdot s^{-1}$左右,白天风速介于12.0~14.0 $m\cdot s^{-1}$之间,民勤最大,凉州最小(图略)。

3.5 沙尘暴能见度的昼夜变化

分析3站春季强沙尘暴和一般沙尘暴能见度的昼夜变化,强沙尘暴变化(图6a)基本趋于一致,张掖迟1 h;00:00—01:00、18:00—19:00最强,能见度为200~267 m,10:00—11:00次之;14:00—15:00、21:00—23:00较弱,能见度为350~400 m。一般沙尘暴(图6b)相反,张掖早1 h;01:00—02:00、08:00—09:00较强,能见度为500~630 m;00:00—01:00、18:00—19:00最弱,能见度为700~800 m。

4 2次典型沙尘暴个例过程特征

4.1 前期气候及天气实况

2019年气温持续偏高,降水2—4月上旬异常偏少,张掖58 d、凉州63 d和民勤66 d未出现有效降水,是自2014年以来最严重的初春干旱,干旱少雨、气温偏高是河西走廊5月沙尘暴多发的主要气候背景。

2019年5月11日和14—15日河西走廊中东部出现区域性大风沙尘天气,局地出现沙尘暴(表1)。5月11日午后张掖、凉州出现大风沙尘暴,最小能见度在600~800 m,极大风力达8级,致使凉州区日光温室受损和农作物受灾,但持续时间短仅10 min左右。5月14日夜间3站出现大风沙尘暴,其中张掖、凉州出现强沙尘暴,极大风力达7~8级,持续时间长,达1~2 h。

4.2 环流特征

4.2.1 高空环流形势 2019年5月2次过程500 hPa脊前均有强的偏北急流不断引导极地干冷空气向南爆发,槽前锋区加强,气压和温度梯度加大,使垂直上升运动加强。第一次大风沙尘暴的影响系统是横槽转竖,10日贝加尔湖到新疆北部的横槽不断南压,11日08:00横槽转竖南压至河西走廊西部,20:00槽加深至河西走廊中部,槽后强的偏北急流引

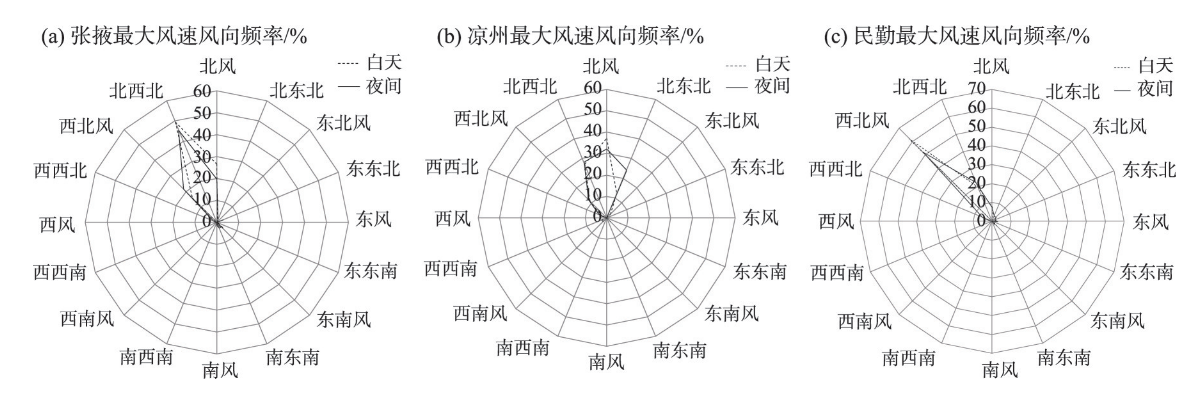


图5 春季沙尘暴发生时的最大风速风向频率昼夜变化玫瑰图

Fig. 5 Rose diagrams of diurnal variation of maximum wind speed direction frequency of sandstorms in spring

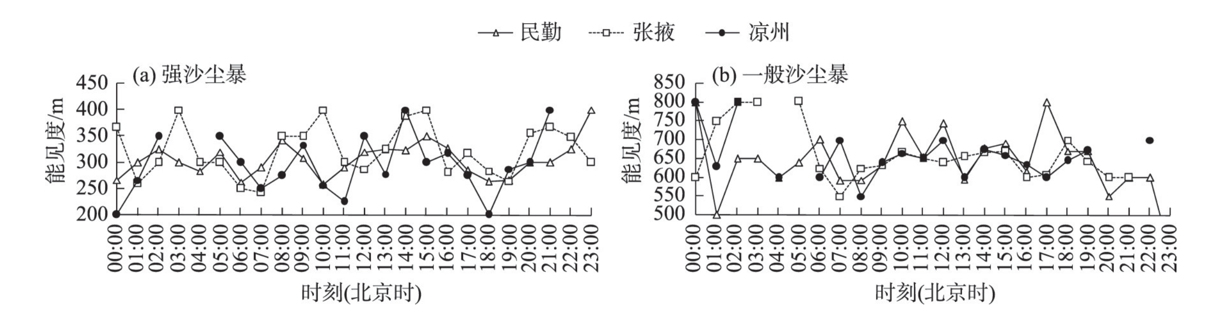


图6 强沙尘暴和一般沙尘暴能见度昼夜变化

Fig. 6 Diurnal visibility variations of strong sandstorms and general sandstorms

表1 2019年5月2次沙尘暴过程实况对比

Tab. 1 Comparison of two sandstorm processes in May 2019

日期	站点	天气现象	极大风力/m·s^{-1}	最大风力/m·s^{-1}	最小能见度/m	出现—结束时间
5月11日(午后)	张掖	沙尘暴	8级	7级	721	16:42—16:51
	凉州	沙尘暴	8级	6级	600	19:46—19:57
5月14—15日(夜间)	张掖	强沙尘暴	7级	5级	343	22:16—00:05
	民勤	沙尘暴	8级	5级	671	01:05—01:46
	凉州	强沙尘暴	7级	5级	446	02:16—03:32

导极地冷空气向南爆发，中心风速增至44 m·s^{-1}(图7a)。第二次强沙尘暴的影响系统是乌拉尔山脊前不稳定低槽发展东移南下，14日08:00西西伯利亚到新疆中东部为经向大槽，槽前疏散；20:00分成南北2个槽，南槽快速移至河西走廊西部，槽后西北风急流加强，中心风速达52 m·s^{-1}，夜间中东部出现强沙尘暴(图7b)。

4.2.2 *地面形势* 冷锋是造成这2次沙尘暴的主要地面系统，沙尘暴发生在冷高压前部，3 h变压较大的地区。第一次发生在冷锋后部，2019年5月11日08:00地面冷高压位于贝加尔湖西南部和新疆北部，地面热低压在河西走廊强烈发展，形成强的气压梯度区，近地层对流不稳定；17:00冷锋已移至河西走廊中东部，3 h变压最大值达10.5 hPa，张掖出现大风沙尘暴；20:00(图8a)热低压东移，中心值达1000 hPa，冷锋过境凉州出现沙尘暴。第二次出现在蒙古气旋底部的冷锋后，2019年5月14日蒙古气旋在(110°E，50°N)附近稳定少动阻挡了地面冷高压的移动，使得冷锋前后气压梯度加大；20:00(图8b)冷锋进入河西走廊西部，3 h变压最大值达7.7 hPa，玉

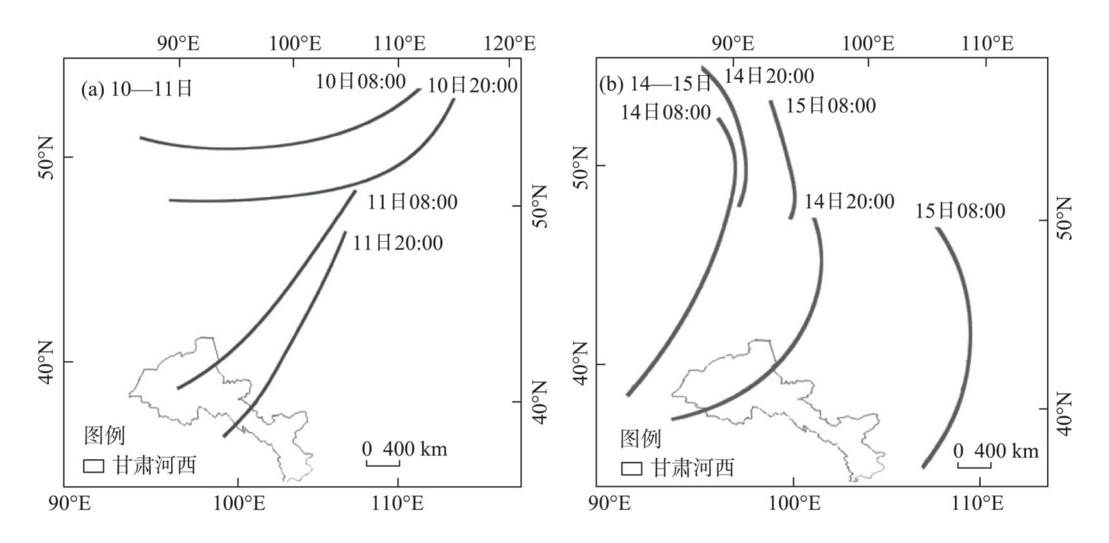
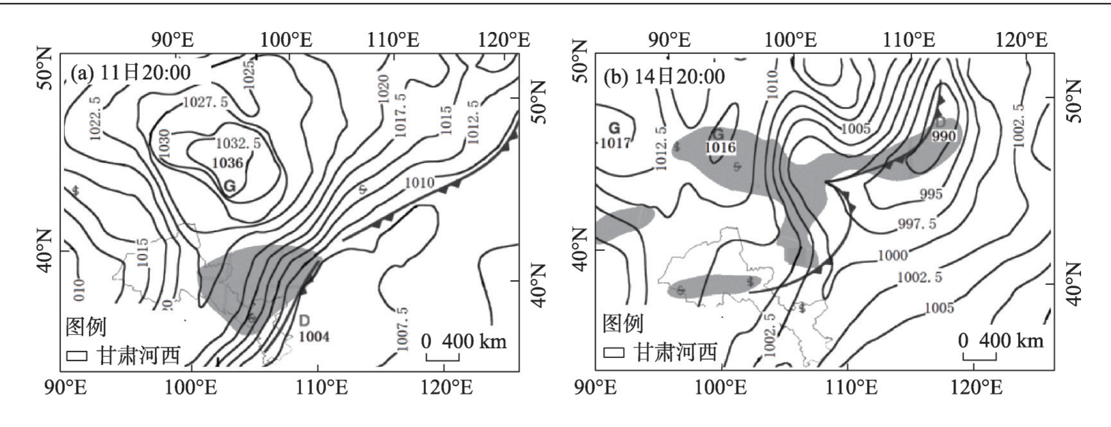


图7 2019年5月10—11日和14—15日500 hPa槽线移动路径

Fig. 7 Trough-line moving paths at 500 hPa from 10 to 11 and from 14 to 15 in May 2019



注:阴影区表示沙尘暴区,G为高压,D为低压。

图8 2019年5月11日20:00、14日20:00地面场

Fig. 8 Surface pressure field at 20:00 BT on 11 and 20:00 BT on 14 in May 2019

门、鼎新等地出现大风扬沙;23:00蒙古气旋继续东移南压,锋面移至中部,张掖出现大风强沙尘暴;02:00锋面过境使东部凉州和民勤出现大风沙尘暴。

4.2.3 气象要素对比 2次过程都发生在最严重初春干旱的气候背景下,具有明显的日变化。虽然均有不稳定层结,地气温差较大,但第二次过程地面更干,下沉气流强,风速小而稳定,更易使地表沙尘吹起在近地面聚集形成强沙尘暴。河西走廊地面多戈壁沙漠,由于沙漠戈壁受热快散热也快,气温日较差特别大,风速日变化突出。午后过程地面剧烈增温、气压急剧降低,使得大气层结不稳定,热力对流最强,易形成动量下传,3 h变压大,导致午后风速明显加大;夜间过程近地层气温下降且形成2层逆温层,热力对流、不稳定层结均减弱,风速减小。多变的风向导致沙尘暴发生概率高达5%~30%。张掖、民勤2次过程均为持续的西北风,而凉州第一次为西北风,第二次风向不断变化,由西北风转为北北东风,后期为东南风,有利于测站北部东南部腾格里沙漠沙尘的吹入,使凉州沙尘暴第二次强度强且持续时间长(表2)。

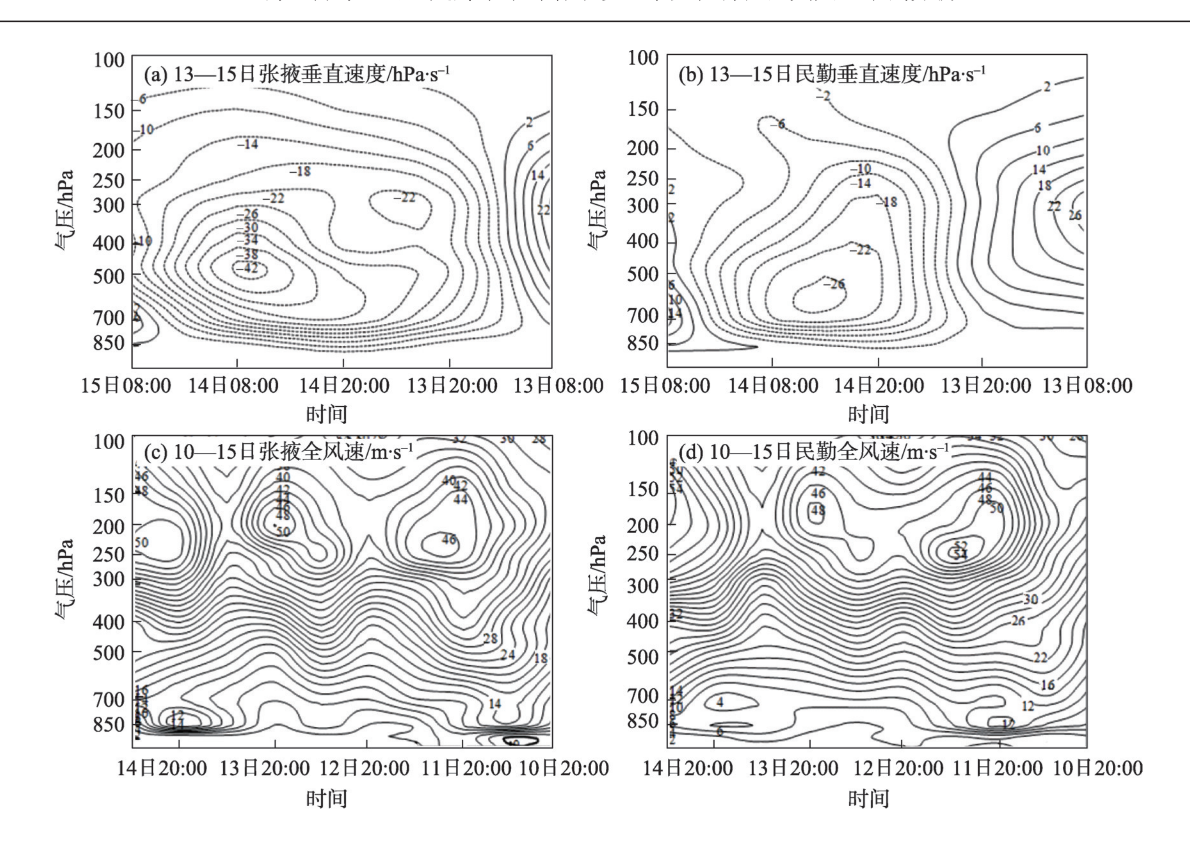
4.3 物理量场

4.3.1 垂直速度场 分析5月13—15日垂直速度时间剖面图(图9a~b),15日凌晨沙尘暴区各层均为上升运动,有利于该区域地面沙尘扬起。13日08:00—

表2 2019年5月2次沙尘暴过程气象要素对比

Tab. 2 Comparison of meteorological elements during two sandstorm processes in May 2019

种类	气象要素	11日20:00	14日20:00
不同点	高空形势	横槽转竖	长波槽分裂南下
	地面系统	热低压后部冷锋型	蒙古气旋底部冷锋型
	冷锋过境时间	11日19:00	15日01:00
	河西走廊3 h最大变压差/hPa	−10.5	−7.7
	河西走廊3 h最大变压差(出现时间)	11日17:00	14日20:00
	500 hPa冷中心强度/°C	−35	−37
	700 hPa冷中心强度/°C	−24	−20
	500 hPa槽前后24 h最大变温/°C	−22	−11
	500 hPa槽前后24 h最大变高差/gpm	32	11
	700 hPa槽前后24 h最大变温/°C	−23	−11
	逆温层数/层	1	2
	逆温层所在高度/hPa	176	200、150
	2 km以下最大风速/m·s^{-1}	14	5
	垂直风切变	4.5	2.2
	下沉对流有效位能	34.8	1022.1
相同点	地面影响系统	冷锋	冷锋
	当天最大地气温差/°C	26.7	26.5
	最大上升速度	5.3	5.4



注：张掖位置100°18′E，39°06′N；民勤位置103°06′E，38°36′N。

图9　2019年5月13—15日垂直速度和10—15日全风速高度-时间剖面

Fig. 9　Height-time profiles of vertical velocity from 13 to 15 and full wind speed from 10 to 15 in May 2019

20:00垂直速度为正值，20:00垂直速度值开始变负且明显增大，14日08:00—20:00从低层到高层为一致的上升运动，张掖、民勤分别在500 hPa、600 hPa出现最大垂直速度中心，中心值分别为-42×10^{-5} $hPa\cdot s^{-1}$、-26×10^{-5} $hPa\cdot s^{-1}$。

4.3.2　全风速场　强风是吹起地面沙尘的动力条件。分析5月10—15日全风速时间剖面图（图9b~d），11日张掖和民勤250 hPa急流中心值分别为46 $m\cdot s^{-1}$、54 $m\cdot s^{-1}$，强风速带向地面伸展，850 hPa分别为14 $m\cdot s^{-1}$、12 $m\cdot s^{-1}$中心，造成沙尘暴。14日夜间张掖和民勤高空急流分别出现在250 hPa、170 hPa，中心值为50 $m\cdot s^{-1}$、56 $m\cdot s^{-1}$，20:00在850 hPa张掖风速达14 $m\cdot s^{-1}$。11日沙尘暴发生在19:00，午后迅速升温，热力对流最强，大气层结极不稳定，有利于高空风动量下传，地面风速加大；14—15日过程发生在夜间，虽高空最大风速中心值大，但其位置较高，近地层气温下降热力对流减弱，大气层结稳定，高空风速难以下传，沙尘暴区风速减小，所以第二次过程风速较小、强度强但未造成灾害损失。

总之沙尘暴爆发于强的垂直运动上升区，垂直速度和高空风速的强度和高度与沙尘暴强度有关。张掖垂直速度中心强、范围大，高空风速大而动量下传高度低，因而沙尘暴较强。

4.3.3　水平螺旋度　水平螺旋度代表入侵边界层冷平流的强度和风随高度逆转程度，其负值中心与下游沙尘暴发生强度有对应关系，负值中心越强，地面大风、沙尘天气越强[28-30]；当水平螺旋度负值中心$\leqslant-200$ $m^2\cdot s^{-2}$，未来24 h内该区下游将出现沙尘暴；当$\leqslant-600$ $m^2\cdot s^{-2}$时，未来6 h内该区下游将有能见度小于500 m的强沙尘暴。这2次过程水平螺旋度负值中心的移动与大风沙尘暴发生时间基本保持一致，但与其下游沙尘暴发生强度对应关系不好。

分析5月10—12日（图10a）和13—15日（图10b）水平螺旋度负值中心移动路径，水平螺旋度负值中心西南向移动增强，11日20:00（图10c）移至内蒙西部，中心值为-597 $m^2\cdot s^{-2}$，下游张掖、凉州出现沙尘暴。13日有2个水平螺旋度负值中心不断南压至新疆北部和贝加尔湖西部；14日08:00负值中心合并到内蒙西部，20:00（图10d）负值中心东北移动到外蒙西部，中心值为-302 $m^2\cdot s^{-2}$，酒泉负值中心为-257 $m^2\cdot s^{-2}$，下游张掖、民勤、凉州从22:00相继出现沙尘暴。11日水平螺旋度负值中心较大，风速较

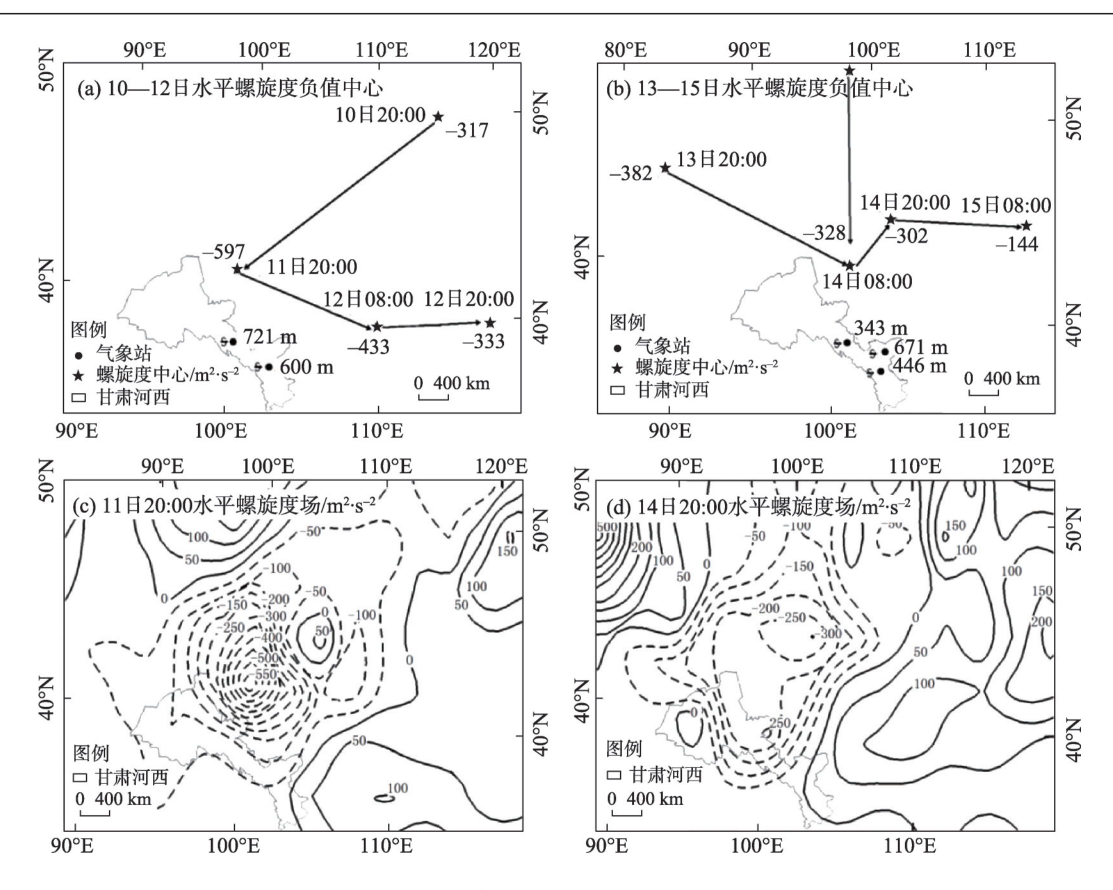


图10　2019年5月10—12日和13—15日水平螺旋度负值中心移动路径及11日20:00和14日20:00水平螺旋度场

Fig. 10　Horizontal helicity negative center moving path from 10 to 12 and from 13 to 15, and Horizontal helicity field at 20:00 BT on 11 and 20:00 BT on 14 in May 2019

强，但沙尘暴强度弱，由于14日夜间垂直速度和风速减小，说明水平螺旋度对夜间沙尘暴强度预报效果较弱。

4.3.4　边界层风速分析　2次过程高低空急流中心值相当，200 hPa、500 hPa、700 hPa急流中心11日20:00分别为54 m·s⁻¹、44 m·s⁻¹、24 m·s⁻¹，对应14日20:00分别为52 m·s⁻¹、40 m·s⁻¹、30 m·s⁻¹。进一步分析10—15日08:00和20:00张掖、民勤边界层（高度3 km以下）的最大风速及其出现高度（图11），张掖、民勤最大风速11日08:00均为9 m·s⁻¹，分别位于2980 m、2510 m；20:00分别为14 m·s⁻¹、18 m·s⁻¹，分别位于1140 m、840 m。张掖、民勤14日20:00最大风速分别为14 m·s⁻¹、8 m·s⁻¹，分别位于500 m、300 m；15日08:00最大风速分别为15 m·s⁻¹、18 m·s⁻¹，高度分别升至1820 m、2300 m。沙尘暴发生前最大风速出现高度第二次较低，第一次过程发生在午后，风速较大且高度低；第二次过程发生在夜间，风速相近而高度升高，因而风速弱、但强度强且持续时间长。

5　结　论

由河西走廊中东部3个代表站沙尘暴观测资料，运用天气学、动力学和统计学相结合的方法，分析河西走廊中东部春季昼夜沙尘暴的时间变化特征和预报着眼点以及对典型昼夜沙尘暴天气的影响系统、物理量、边界层特征和气象要素。得出如下结论：

（1）河西走廊中东部近60 a春季沙尘暴呈减少趋势，20世纪60、70年代较多，但20世纪80年代开始显著减少。分析原因是20世纪70年代大风日数较多，1988 a以后大风日数显著减少，气温显著升高，降水增多。春季沙尘暴日数与年大风日数正相关、春季气温负相关，相关系数分别达0.71、−0.59，均通过了0.01信度检验。与降水呈负相关，但相关系数较小，为−0.18。

（2）近60 a沙尘暴白天基本多于夜间，20世纪80年代后一般沙尘暴均多于强沙尘暴。高发区均在民勤，丰富沙源、风多而强是其居于河西走廊之

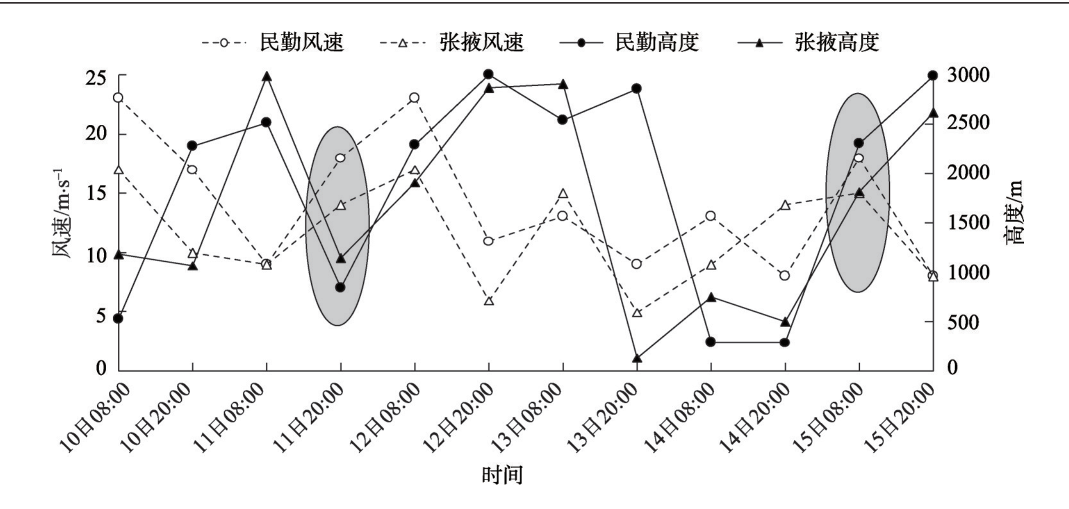


图11　2019年5月10—15日08:00和20:00张掖、民勤边界层(3 km以下)最大风速及出现高度(阴影区)

Fig. 11　Maximum wind speed and its occurred height (shadow area) in the boundary layer (below 3 km) of Zhangye and Minqin at 08:00 BT and 20:00 BT from 10 to 15 in May 2019

首的重要客观原因,但大风、气温和降水等是造成沙尘暴强度和日数变化的直接气象因素。沙尘暴过境各站盛行风向不同,昼夜盛行风向一致,集中在西北风到偏北风之间;风速白天较强,民勤较大。不同强度沙尘暴能见度日变化相反,00:00—01:00、18:00—19:00强沙尘暴最强,而08:00—09:00一般沙尘暴最强,张掖强沙尘暴较强,是因为张掖地处天气系统上游的西北方向,强沙尘暴常由蒙古气旋造成,具有强烈的上升运动,而张掖距离蒙古气旋较近,因而强度强出现早。

(3) 2019年5月11日第一次过程500 hPa的影响系统是横槽转竖,沙尘暴发生在槽前,槽前的东北脊稳定少动。5月14—15日第二次主要是乌拉尔山脊前不稳定低槽发展东南下,2次过程脊前均有强的偏北急流不断引导极地干冷空气向南爆发。大风沙尘暴的强度与下垫面、日变化密切相关,河西走廊地面多戈壁沙漠,地气温差和风速日变化显著,白天热力对流最强,层结不稳定,导致午后过程风速大;夜间湿度小,不稳定层结减弱,垂直风切变较小,因而更易形成持续时间较长的强沙尘暴。多变的风速风向和新站周围荒漠环境,使凉州在第二次过程中沙尘暴强度强且持续时间长。

(4) 沙尘暴爆发于强的垂直运动上升区,垂直速度大值中心和最大风速的出现时间和高度与沙尘暴强度有关。2次过程高低空急流中心值相近,但午后增温有利于高空动量下传,使近地面层的风速增大且高度降低;夜间高空风速较大但高度高,因无明显动量下传,风速较小,未造成灾害损失。水平螺旋度负值中心的移动与这2次大风沙尘暴发生时间及区域基本保持一致,但对夜间沙尘暴强度预报效果较弱。

(5) 文中对河西走廊中东部春季沙尘暴时间变化特征的地理、气候和天气成因进行对比分析,还需要大量沙尘暴个例从高低空垂直边界层等方面进一步证实。

参考文献(References)

[1] 余予, 孟晓艳, 刘娜, 等. 近50年春季沙尘活动及其对PM_{10}质量浓度的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 988-994. [Yu Yu, Meng Xiaoyan, Liu Na, et al. Spring dust activities over northern China and its impacts on PM_{10} pollution in recently 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 988-994.]

[2] 周旭, 张镭, 陈丽晶, 等. 沙尘暴过程中沙尘气溶胶对气象场的影响[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1422-1432. [Zhou Xu, Zhang Lei, Chen Lijing, et al. Influence of the dust aerosols on meteorological fields during dust storm[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1422-1432.]

[3] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840. [Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.]

[4] 宿兴涛, 王汉杰, 宋帅, 等. 近10年东亚沙尘气溶胶辐射强迫与温度响应[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1300-1307. [Su Xingtao, Wang Hanjie, Song Shuai, et al. Radiative force and temperature response of dust aerosol over east Asia in recent decade[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(5): 1300-1307.]

[5] 张鹏, 王春姣, 陈林, 等. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注

的若干问题[J]. 气象, 2018, 44(6): 725-736. [Zhang Peng, Wang Chunjiao, Chen Lin, et al. Current status of satellite based dust aerosol remote sensing and some issues to be concerned[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(6): 725-736.]

[6] 安林昌, 张恒德, 桂海林, 等. 2015年春季华北黄淮等地一次沙尘天气过程分析[J]. 气象, 2018, 44(1): 180-188. [An Linchang, Zhang Hengde, Gui Hailin, et al. Analysis of a sand and dust weather process affecting north China and Huanghuai in spring 2015[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(1): 180-188.]

[7] 田磊, 张武, 常倬林, 等. 河西走廊干旱区春季沙尘气溶胶对辐射的影响初步研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 923-929. [Tian Lei, Zhang Wu, Chang Zhuolin, et al. Influence of spring dust aerosol on radiation over the arid area in Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 923-929.]

[8] Yang Y Q, Wang J Z, Niu T, et al. The variability of spring sandduststorm frequency in northeast Asia from 1980 to 2011[J]. Journal of Meteorological Research, 2013, 27(1): 119-127.

[9] Indoitu R, Orlovsky L, Orlovsky N. Duststorms in Central Asia: Spatial and temporal variations[J]. Journal of Arid Environments, 2012, 85: 62-70.

[10] Kurosaki Y, Mikami M. Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(14): 1736.

[11] 张莉, 任国玉. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 744-750. [Zhang Li, Ren Guoyu. Change in dust storm frequency and the climatic controls in northern China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(6): 744-750.]

[12] 李万源, 吕世华, 董治宝, 等. 中国北方春季沙尘暴频次的多要素线性拟合[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1302-1313. [Li Wanyuan, Lü Shihua, Dong Zhibao, et al. Linear fitting of multi-meteorogical factors of spring dust storm frequency for northern China[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(5): 1302-1313.]

[13] 景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 影响中国北方特强沙尘暴的环流系统分型研究[J]. 干旱资源与环境, 2004, 18(1): 14-18. [Jing Tao, Qian Zheng'an, Jiang Xuegong, et al. A study on weather types of super strong dust storm in north of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1): 14-18.]

[14] 冯鑫媛, 王式功, 程一帆, 等. 中国北方中西部沙尘暴气候特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 394-399. [Feng Xinyuan, Wang Shigong, Cheng Yifan, et al. Climatic characteristics of dust storms in the middle and west of northern China[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 394-399.]

[15] 张强, 王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 675-681. [Zhang Qiang, Wang Sheng. On physical characteristics of heavy dust storm and its climatic effect [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(5): 675-681.]

[16] 赵建华, 张强, 李耀辉, 等. "7.17"西北夏季沙尘暴数值模拟[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1222-1228. [Zhao Jianhua, Zhang Qiang, Li Yaohui, et al. Numerical simulation of "7.17" sand-dust storm in north west China[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(6): 1222-1228.]

[17] 钱莉, 滕杰, 胡津革. "14.4.23"河西走廊特强沙尘暴演变过程特征分析[J]. 气象, 2015, 41(6): 745-754. [Qian Li, Teng Jie, Hu Jinge. Characteristic analysis of the "2014.4.23" strong sandstorm's evolution process in Hexi Corridor[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(6): 745-754.]

[18] 李岩瑛, 张爱萍, 李红英, 等. 河西走廊边界层高度与风沙强度的关系[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 11-20. [Li Yanying, Zhang Aiping, Li Hongying, et al. Relationship between boundary layer height and wind-sand intensities over Hexi Corridor China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 11-20.]

[19] 高振荣, 李红英, 翟汶, 等. 近55年来河西地区沙尘暴时空演变特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 76-81. [Gao Zhenrong, Li Hongying, Qu Wen, et al. The spatial and temporal distribution features of sand-dust storms in Hexi Corridor region in recent 55 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 76-81.]

[20] 蒋盈沙, 高艳红, 潘永洁, 等. 青藏高原及其周边区域沙尘天气的时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 83-91. [Jiang Yingsha, Gao Yanhong, Pan Yongjie, et al. Spatial and seasonal distributions of sand dusts in Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 83-91.]

[21] 王新源, 刘世增, 陈翔舜, 等. 河西走廊绿洲面积动态及其驱动因素[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 212-219. [Wang Xinyuan, Liu Shizeng, Chen Xiangshun, et al. Dynamic changes and driving factors of oasis in Hexi Corridor[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 212-219.]

[22] 廉陆鹞, 刘滨辉. 近58 a我国西北地区干期与湿期变化特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1301-1309. [Lian Luyao, Liu Binhui. Change characteristics of dry and wet spells in northwest China during the past 58 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1301-1309.]

[23] 常茜, 鹿化煜, 吕娜娜, 等. 1992—2015年中国沙漠面积变化的遥感监测与气候影响分析[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 57-63. [Chang Xi, Lu Huayu, Lü Nana, et al. Variation of desert and sandy field in China on the basis of remote sensing analysis and the relationship with climate change during 1992—2015[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 57-63.]

[24] 马俊, 牟雪松, 王永达, 等. 近1 ka以来河西地区的沙漠化及对高强度人类活动的响应分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 1043-1052. [Ma Jun, Mou Xuesong, Wang Yongda, et al. Response of desertification to intensified human activities over the latest 1 ka in Hexi region[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 1043-1052.]

[25] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 224-230. [Li Dongliang, Liu Dexiang. Gansu climate[M]. Beijing: Meteorological Press, 2000: 224-230.]

[26] 刘洪兰, 张强, 张俊国, 等. 1960—2012年河西走廊中部沙尘暴空间分布特征和变化规律[J]. 中国沙漠, 2014, 34(4): 1102-1108. [Liu Honglan, Zhang Qiang, Zhang Junguo, et al. Spatial distribution and variation of sandstorms in the central Hexi Corridor during 1960—2012[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(4):

1102−1108.]
[27] 柳菲, 陈沛源, 于海超, 等. 民勤绿洲不同土地利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 406−414. [Liu Fei, Chen Peiyuan, Yu Haichao, et al. Spatial distribution characteristics of soil water and salt under different land use types in Minqin Oasis[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 406−414.]
[28] 李岩瑛, 张强. 水平螺旋度在沙尘暴预报中的应用[J]. 气象学报, 2012, 70(1): 144−154. [Li Yanying, Zhang Qiang. An application of the horizontal helicity to forecasting sandstorm[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(1): 144−154.]
[29] 王伏村, 许东蓓, 王宝鉴, 等. 河西走廊一次特强沙尘暴的热力动力特征分析[J]. 气象, 2012, 38(8): 950−959. [Wang Fucun, Xu Dongbei, Wang Baojian, et al. Diagnostic analysis of thermal and dynamical characteristics of a heavy dust storm in Hexi Corridor [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(8): 950−959.]
[30] 李岩瑛, 张强, 李耀辉, 等. 水平螺旋度与沙尘暴的动力学关系研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 692−703. [Li Yanying, Zhang Qiang, Li Yaohui, et al. Dynamic relationships between the horizontal helicity and the sandstorm[J]. Chinese Journal of Geophysic, 2008, 51(3): 692−703.]

Variation characteristics of spring sandstorm and its typical case analysis in the middle east of Hexi Corridor

YANG Mei[1,2], LI Yanying[1,2], ZHANG Chunyan[1], YANG Jiping[3], LUO Xiaoling[1], NIE Xin[2]

(1. Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei 733000, Gansu, China; 2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Minqin Meteorological Bureau, Minqin 733300, Gansu, China)

Abstract: The middle east of the Hexi Corridor is a serious disaster area with a high incidence of spring sandstorms in China. Over the past 40 years, economic losses have exceeded RMB 15×10^8 Yuan, and nearly 100 people have died. To analyze the laws of time variation and improve forecasting and early warning and combine them with meteorological, dynamics, and statistical methods, this paper used the ground observation meteorological sandstorm data during 1961—2019 and meteorological data of two sandstorms in May 2019. Data were obtained to characterize daily changes and forecast the focus of spring sandstorms in the region. The results show that (1) the number of spring sandstorms in the middle east of Hexi has declined over the past 60 years, particularly in the 1980s. Furthermore, the intensity of sandstorms changed significantly between day and night. Wind speeds during the day were increasing, and since the 1980s there were more common sandstorms than strong sandstorms, and all high-incidence areas were in Minqin. (2) When the sandstorms crossed the border, the main wind directions of the three stations were the same, and they were concentrated between the northwest wind and the north wind. The strongest intense sandstorms appeared at 00:00—01:00 and 18:00—19:00, and the strongest general sandstorms occurred at 08:00—09:00. (3) The two sandstorms that occurred in the afternoon and night of May 2019 were comparatively analyzed. The afternoon process had strong winds and caused disasters, and the night process was stronger and longer. The moderate and low synoptic weather conditions of the two sandstorms were basically the same. Both appeared downstream of the negative center of horizontal helicity, with significant ground-air temperature differences. However, the synoptic circulations of 500 hPa were different. In the afternoon process, there was a transverse trough that turned into a vertical trough. Finally, daily variations in temperature and wind speed were more significant with unstable stratification. Downward upper air momentum and low maximum wind speeds occurred at heights near the surface. The night-time process was influenced mainly by unstable trough development and the cold front at the bottom of the Mongolia cyclone, with strong vertical ascending movements but less vertical wind shear. (4) Spring sandstorms in the middle east of Hexi Corridor were related not only to large-scale circulation conditions but also to physical parameters such as vertical velocity, horizontal helicity, highest wind speed, daily variation of surface temperature, humidity and wind, unstable parameters, and boundary layer elements.

Key words: spring sandstorms; variation characteristics; forecast point; middle east of Hexi Corridor